

# Heimkinolautsprecher HKL-01 Dokumentation



Nils Öllerer

März 2011, Hannover  
Alle Rechte vorbehalten.

---

# Inhaltsverzeichnis

|          |                                 |           |
|----------|---------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Anforderungen .....</b>      | <b>3</b>  |
| <b>2</b> | <b>Entwicklung.....</b>         | <b>3</b>  |
| 2.1      | Treiber .....                   | 3         |
| 2.2      | Gehäuse .....                   | 4         |
| 2.3      | Endstufen.....                  | 8         |
| 2.4      | Aktivweiche .....               | 10        |
| <b>3</b> | <b>Messungen .....</b>          | <b>10</b> |
| 3.1      | Messaufbau .....                | 10        |
| 3.2      | Amplitudengang .....            | 12        |
| 3.3      | Phasengang.....                 | 14        |
| 3.4      | Abstrahlverhalten .....         | 15        |
| 3.5      | Nichtlineare Verzerrungen ..... | 16        |
| 3.6      | Zerfallsspektrum .....          | 18        |
| <b>4</b> | <b>Technische Daten .....</b>   | <b>19</b> |

# 1 Anforderungen

Der Lautsprecher soll speziell in einem Heimkino eingesetzt werden. Die Zielvorgaben für die Konstruktion dieses Aktivlautsprechers waren folgende:

1. Möglichst konstantes Abstrahlverhalten
2. Hoher Maximalpegel (geringe nichtlineare Verzerrungen)
3. Der Frequenzbereich 20 - 100 Hz wird von einem externen Subwoofersystem übernommen
4. Einsatz hinter akustisch transparenter Leinwand
5. Idealerweise Wandeinbau

Forderung 1 lässt sich mit einem Doppelwaveguide erreichen. Dieser hat den Vorteil, dass das Abstrahlverhalten nicht nur konstant, sondern außerdem relativ eng gehalten wird. Der Raum wird somit deutlich weniger angeregt als mit einem Halbraumstrahler. Gleichzeitig wird durch den Waveguide Punkt 2 erfüllt, da durch die Bündelung der Kennschalldruck im Mittel- und Hochtonbereich höher ausfällt.

Aus 3 folgt, dass statt einem Tieftöner ein Tiefmitteltöner eingesetzt werden kann. Durch die geringe Bandbreite kann dieser einen hohen Kennschalldruck aufweisen und in ein geschlossenes Gehäuse mit geringem Volumen verbaut werden. Die Intermodulation wird somit gering gehalten. Das erfüllt gleichzeitig Forderung 2.

Aus den Punkten 4 und 5 folgt ein möglichst flaches und universell einsetzbares Gehäuse ohne integrierte Elektronik. Die Endstufen und die Aktivweiche sollen also separat ausgeführt werden. Das hat den weiteren Vorteil einer problemlosen Installation beim Wechsel der Umgebung.

## 2 Entwicklung

### 2.1 Treiber

Da das Gesamtkonzept maßgeblich durch einen fertig entworfenen Doppelwaveguide bestimmt wird, war die Wahl der Mittel- und Hochtontreiber bereits festgelegt. Das Waveguidemodul wurde speziell für die unten stehenden Treiber entwickelt. Besonders hervorzuheben ist die 75-mm-Mitteltonkalotte von Tang Band, die sich durch sehr niedrige nichtlineare Verzerrungen auszeichnet.

Wie im vorherigen Kapitel beschrieben, wurde das Projekt als 4-Wege-System ausgelegt. Die Anforderungen an den Tiefmitteltöner waren damit klar definiert. Er sollte vor allem folgende Eigenschaften besitzen:

1. Geringe Bandbreite (Einsatz erst ab 100 Hz notwendig)
2. Hohe Kennempfindlichkeit
3. Geringe nichtlineare Verzerrungen
4. Hoher Maximalpegel

Derartige Tiefmitteltöner sind praktisch nur im PA-Bereich zu finden. Die hohe Kennempfindlichkeit sorgt für eine geringe Power-Kompression und niedrige Anforderungen an die Leistung der Endstufe.

Ein hoher Maximalpegel wird durch großen linearen Hub und/oder eine große Membranfläche erreicht. Da das Abstrahlverhalten möglichst nicht zu sehr von dem des Mitteltöners im Waveguide abweichen sollte, kam nur ein großer Treiber in Frage. Die möglichst geringe Tiefe des Lautsprechergehäuses limitierte die in Frage kommende Größe allerdings. Ein 30-cm-Tiefmitteltöner von Beyma stellte schlussendlich den besten Kompromiss dar. Dieser wurde in ein geschlossenes Volumen mit ca. 20 Litern verbaut.

Folgende Komponenten wurden verbaut:

**Tiefmitteltöner:** Beyma 12G40  
**Mitteltöner:** Tang Band 75-1558SE  
**Hochtöner:** Seas 27TAFc/G (27TAFPlus)



Die Trennfrequenzen liegen bei 600 Hz und 2400 Hz. Dies ergibt sich aus der Forderung nach einem möglichst konstanten Abstrahlverhalten. Tabelle 1 zeigt die daraus resultierenden Bandbreiten der einzelnen Zweige.

| Zweig                       | Frequenzbereich (Hz) | Oktaven |
|-----------------------------|----------------------|---------|
| Tieftöner (Subwoofersystem) | 10 – 100             | 2,2     |
| Tiefmitteltöner             | 100 – 600            | 2,5     |
| Mitteltöner                 | 600 – 2400           | 2       |
| Hochtöner                   | 2400 – 20.000        | 3       |

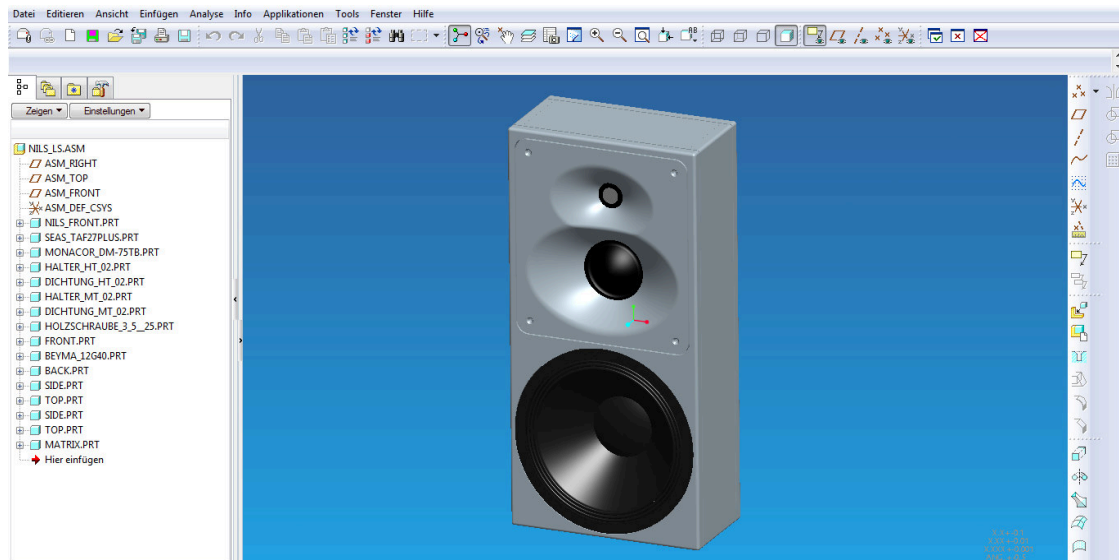
**Tabelle 1: Bandbreiten der einzelnen Treiber**

Der große Vorteil des 4-Wege-Konzepts liegt darin, dass der Tieftonbereich von einem optimierten Subwoofersystem (z.B. [Double Bass Array](#)) übernommen werden kann, das unabhängig vom restlichen Lautsprecher positioniert und konfiguriert wird. Weiterhin werden durch die geringere Bandbreite und den reduzierten Hub des Tiefmitteltöners Intermodulationsverzerrungen im Grundton verringert.

## 2.2 Gehäuse

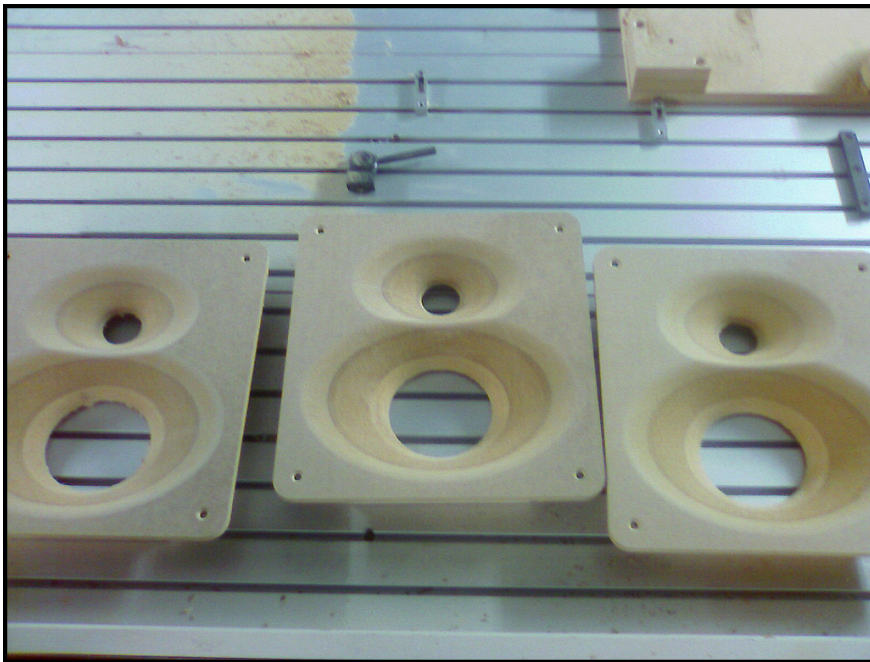
Das Gehäuse wurde zunächst mit Pro/ENGINEER entworfen. Die Abmaße sollten so gering wie möglich ausfallen.

Die Kontur des Waveguides wurde mit ABEC entwickelt und in Pro/ENGINEER importiert. Das Waveguidemodul ist als eigenständige Einheit ausgelegt, so dass dieses bei einem späteren Gehäusewechsel weiterhin verwendet werden kann.



**Abbildung 1: Gehäuseplanung mit Pro/ENGINEER**

Die Waveguides wurden per CNC-Fräsung aus MDF gefertigt. Anschließend wurden beide Gehäuseteile matt schwarz lackiert.



**Abbildung 2: Waveguides nach dem CNC-Fräsen**





**Abbildung 3: Rückseite der Waveguidemodule**



**Abbildung 4: Lackierung der Gehäuseteile**

Mittel- und Hochtontreiber wurden von hinten in die Aussparungen im Waveguidemodul eingelassen und anschließend über einen Rahmen befestigt.



**Abbildung 5: Montierung der Treiber auf dem Waveguide**

Die Lautsprecher sind an der Unterseite mit einer 8-poligen speakON-Buchse ausgestattet, so dass alle drei Treiber mit einem einzigen Multicore-Kabel angesteuert werden können.



**Abbildung 6: speakON-Anschluss**

Es wurden drei identische Exemplare gebaut, die im Heimkino als Frontlautsprecher eingesetzt werden. Sie unterscheiden sich nur durch die Position des speakON-Anschlusses an der Unterseite.





Abbildung 7: Drei komplett montierte Lautsprecher

### 2.3 Endstufen

Die Anforderungen an die drei Endstufen ergaben sich aus dem Gesamtkonzept und den Eigenschaften des Lautsprechers. Diese waren folgende:

1. Genügend Ausgangsleistung für den angeschlossenen Treiber
2. Gute Messwerte
3. Geringe Abmessungen

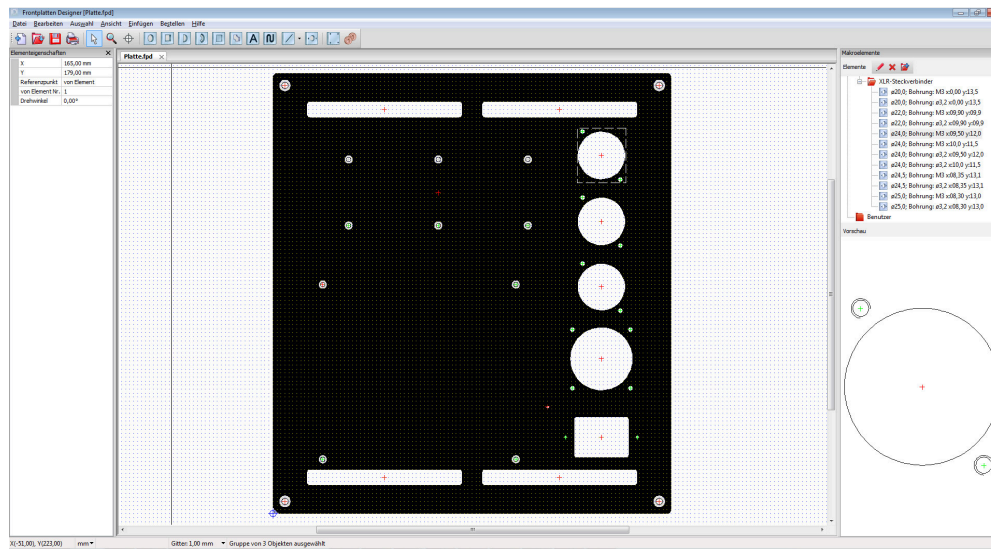
Die Wahl der Endstufen fiel auf das [Hypex UcD180ST](#). Es handelt sich um ein kompaktes Klasse-D-Endstufenmodul mit einer Ausgangsleistung von ca. 160 W RMS an 6  $\Omega$ , was selbst für den Tiefmitteltöner ausreicht, um die mechanische Belastbarkeit zu erreichen.



Abbildung 8: Hypex UcD180ST

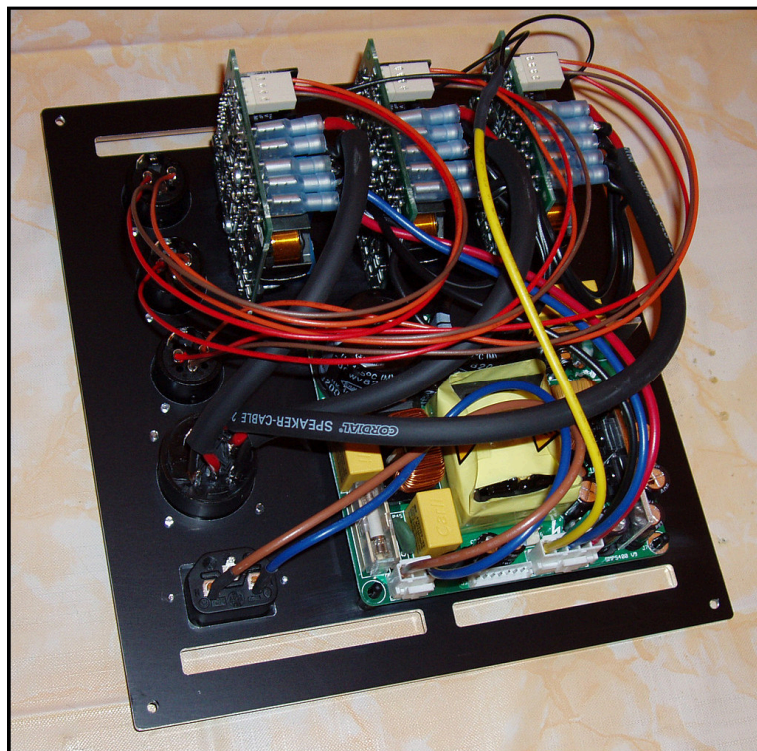
Auch wenn Klasse D eine geringere Verlustleistung produziert als Klasse AB, benötigen die Endstufen dennoch eine Aluminiumplatte zur Wärmeabfuhr. Die Platte wurde so kompakt wie möglich entworfen und bringt neben den Endstufen und dem Netzteil auch alle nötigen Ein- und Ausgäbuchschen unter.





**Abbildung 9: Planung der Endstufenfrontplatte**

Die Aluminiumplatte wurde vom Hersteller schwarz eloxiert und mit Gewinden ausgestattet, so dass sich die Montage der Bauteilgruppen sehr einfach gestaltet. Um die Empfindlichkeit der Endstufen zu senken und damit das Rauschen der Aktivweiche abzuschwächen, wurde ein Spannungsteiler an die Eingangsbuchsen gelötet.



**Abbildung 10: Endstufen auf Aluminiumplatte montiert**

Die Aluminiumplatte wurde anschließend auf ein kleines MDF-Gehäuse geschraubt. Die Maße der Platte sind 220 x 200 mm. Durch die geringe Tiefe lässt sich das Endstufengehäuse problemlos unsichtbar in Wandnähe integrieren.



Abbildung 11: Fertig montiertes Endstufengehäuse

## 2.4 Aktivweiche

Als digitale Aktivweiche kommt ein ALTO Maxidrive 3.4 PC zum Einsatz. Die Wahl fiel vor allem aus Kostengründen auf dieses Modell.

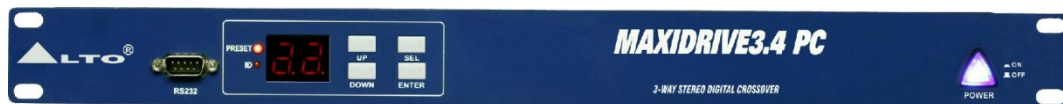


Abbildung 12: ALTO Maxidrive 3.4 PC

Das Maxidrive bietet für jeden Ausgang genug parametrische Equalizer für eine ausreichend genaue Entzerrung der einzelnen Zweige. Weiterhin sind fünf parametrische Equalizer pro Eingang verfügbar, die für eine mögliche Raumentzerrung eingesetzt werden können. Die Flankensteilheit der Linkwitz-Riley-Filter ist bis 48 dB/Okt einstellbar.

## 3 Messungen

### 3.1 Messaufbau

Da die Einstellung der Aktivweiche nur möglich ist, wenn genaue Messergebnisse der Treiber vorliegen, wurden alle Messungen in einer Turnhalle durchgeführt. Diese hat durch ihre Größe den Vorteil, dass die Reflexionen der Wände erst sehr spät am Mikrofon eintreffen und somit leicht durch eine Fensterung ausgeblendet werden können.



Abbildung 13: Messanordnung mit Messabstand von 3 m

Die Reflexion vom Boden wurde durch eine Messung in großer Höhe (2,5 m) verzögert. In Abbildung 14 ist zu erkennen, dass die erste Reflexion vom Boden nach ca. 8 ms eintrifft, was 2,7 m entspricht.

Damit sich die einzelnen Zweige wie im späteren Einsatz überlagern, wurde der Lautsprecher im Fernfeld gemessen. Das Mikrophon befand sich dafür in 3 m Entfernung.

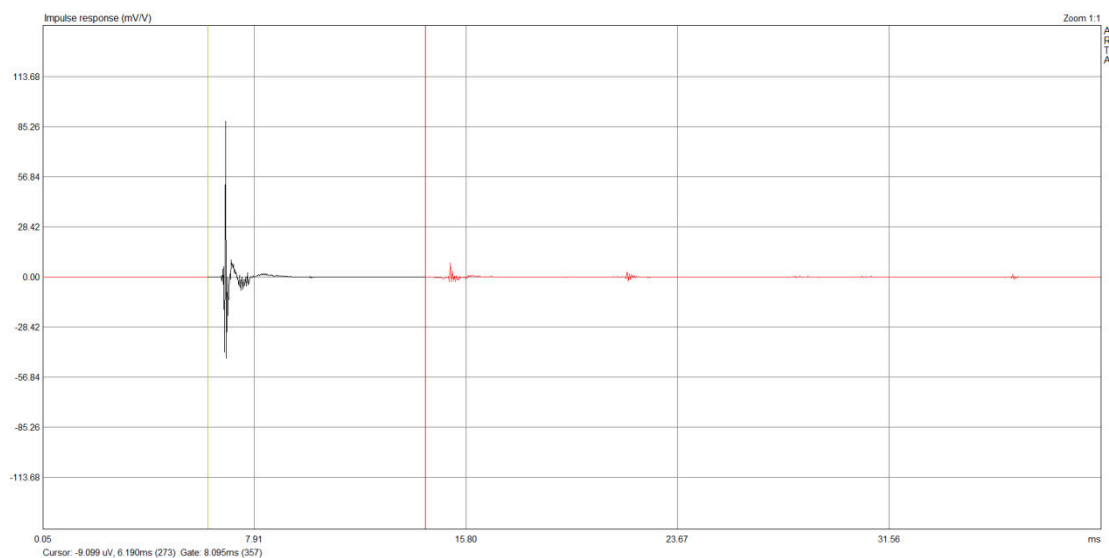


Abbildung 14: Impulsantwort mit Fensterung

Gemessen wurde mit ARTA 1.7. Als Mikrophon kam ein kalibriertes IMG STAGE LINE ECM-40 zum Einsatz.



### 3.2 Amplitudengang

Zunächst wurden die einzelnen Zweige gemessen und die Amplitudengänge per parametrischem Equalizer eine Oktave über die gewünschte Trennfrequenz hinaus entzerrt. Die Darstellung erfolgt mit einer Glättung von 1/24 Oktave.

Im Amplitudengang des Hochtöners (Abbildung 15) sind Interferenzmuster durch Kantendiffraktionen zu sehen. Da der Lautsprecher später in eine Wand eingebaut werden soll, hat das jedoch keinerlei Bedeutung.

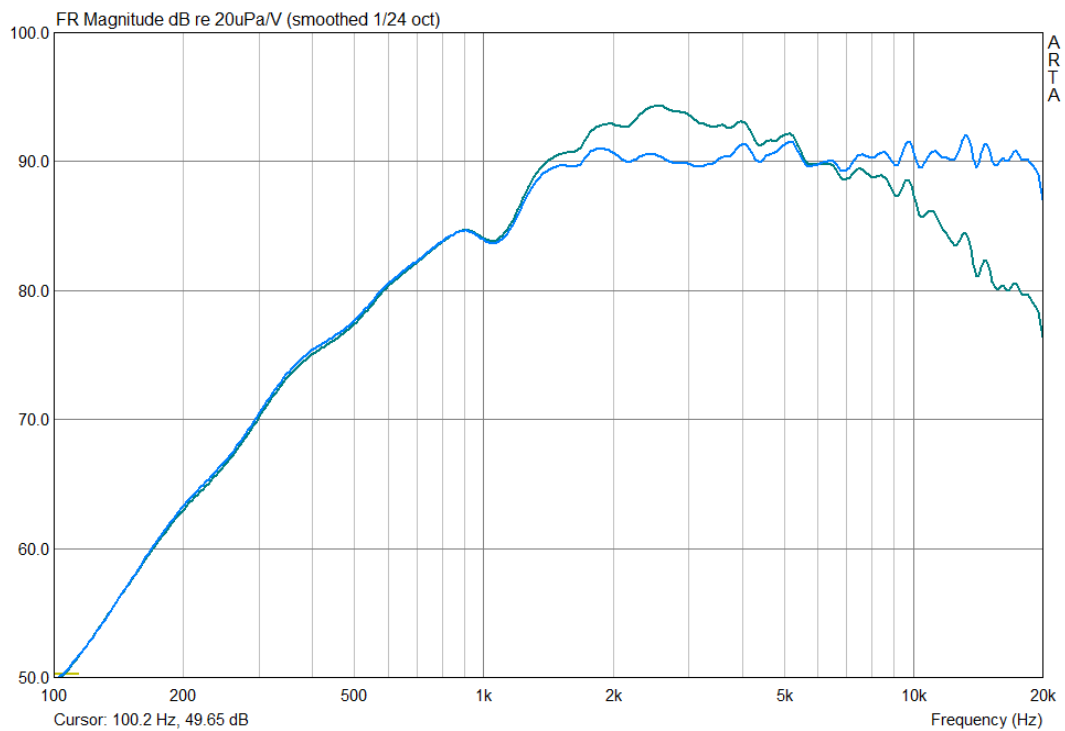


Abbildung 15: Entzerrung des Hochtöners

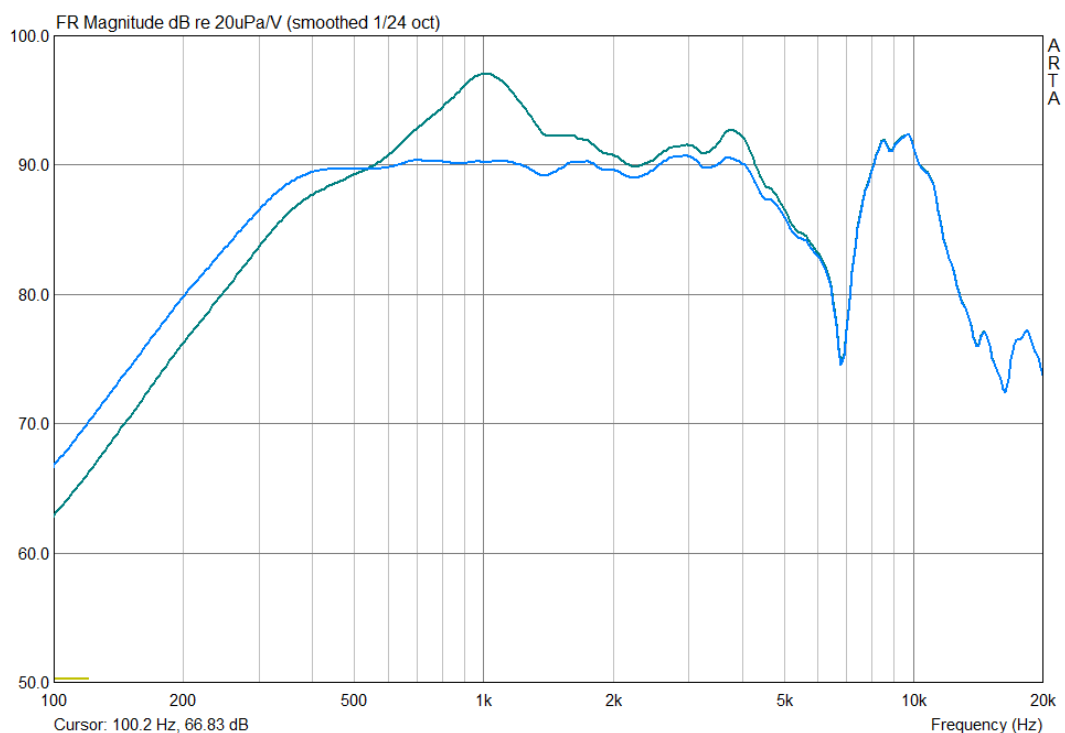


Abbildung 16: Entzerrung des Mitteltöners



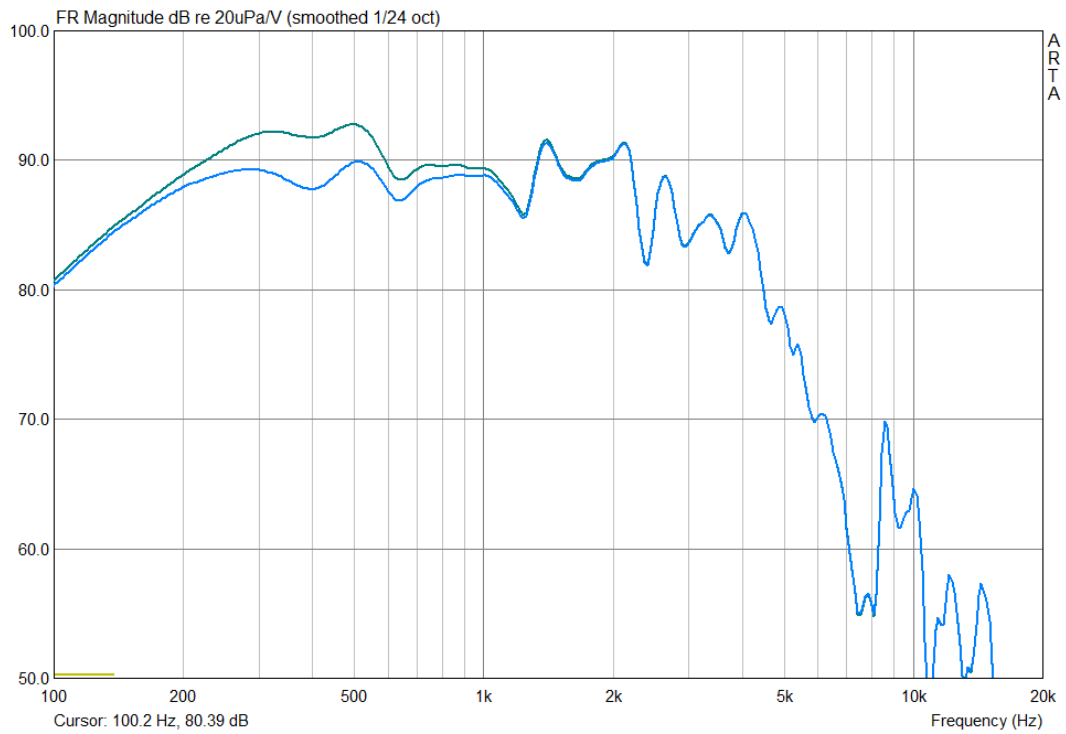


Abbildung 17: Entzerrung des Tiefmitteltöners

Nach der Entzerrung wurden die Zielfunktionen vorgegeben und die Verstärkungen so angepasst, dass alle Zweige denselben Pegel aufwiesen. Da die Schallentstehungsorte (SEO) von Tief-, Mittel- und Hochtöner nahezu in derselben Ebene liegen, waren nur geringe Verzögerungen notwendig. Die Flankensteilheit bei 2400 Hz wurde später von 24 auf 48 dB/Okt erhöht, um Interferenzen zwischen Mittel- und Hochtöner zu minimieren.

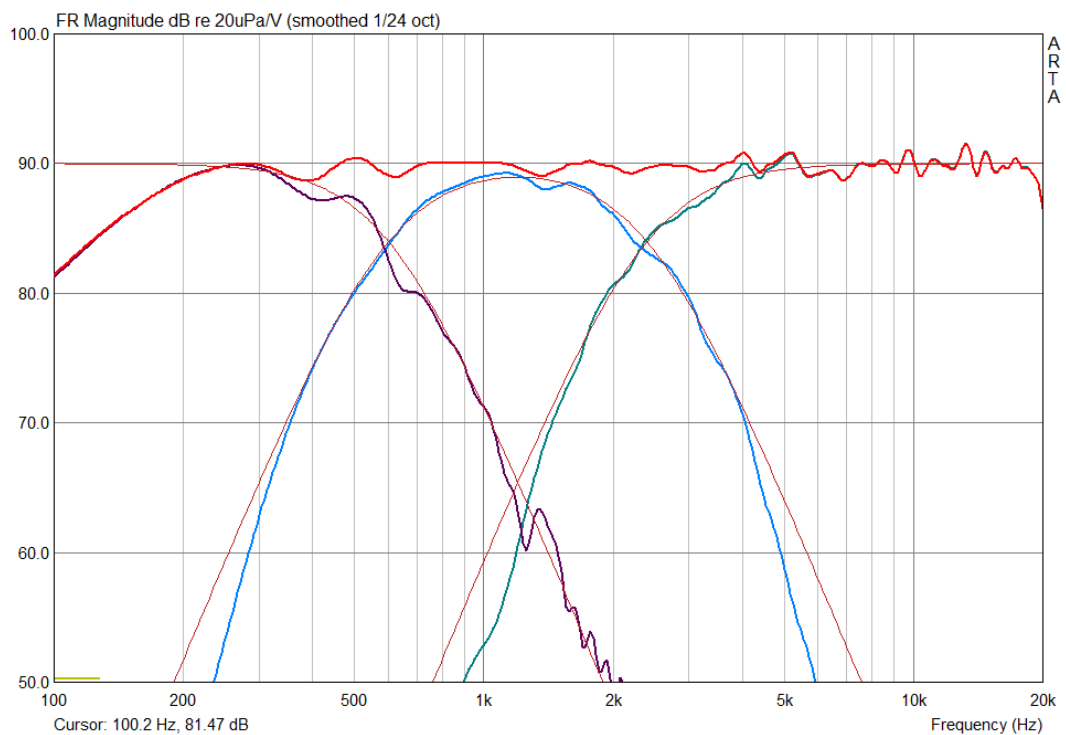


Abbildung 18: Amplitudengänge

Der Abfall des Tiefmitteltöners bei 200 Hz wurde bewusst nicht entzerrt, da der spätere Wandeinbau das Abstrahlverhalten und damit auch den Amplitudengang massiv beeinflusst. Die Entzerrung in diesem Bereich findet direkt im Raum statt.

### 3.3 Phasengang

Abbildung 19 zeigt den ungeglätteten Phasenverlauf. Wie die Filtersteilheiten von 24 dB/Okt und 48 dB/Okt erwarten lassen, ergeben sich  $360^\circ$  und  $720^\circ$  Phasendrehung im Bereich der Trennfrequenzen. Die Phasendrehung am oberen Ende des Übertragungsbereiches entsteht durch den steilen Tiefpass im D/A-Wandler der digitalen Aktivweiche.

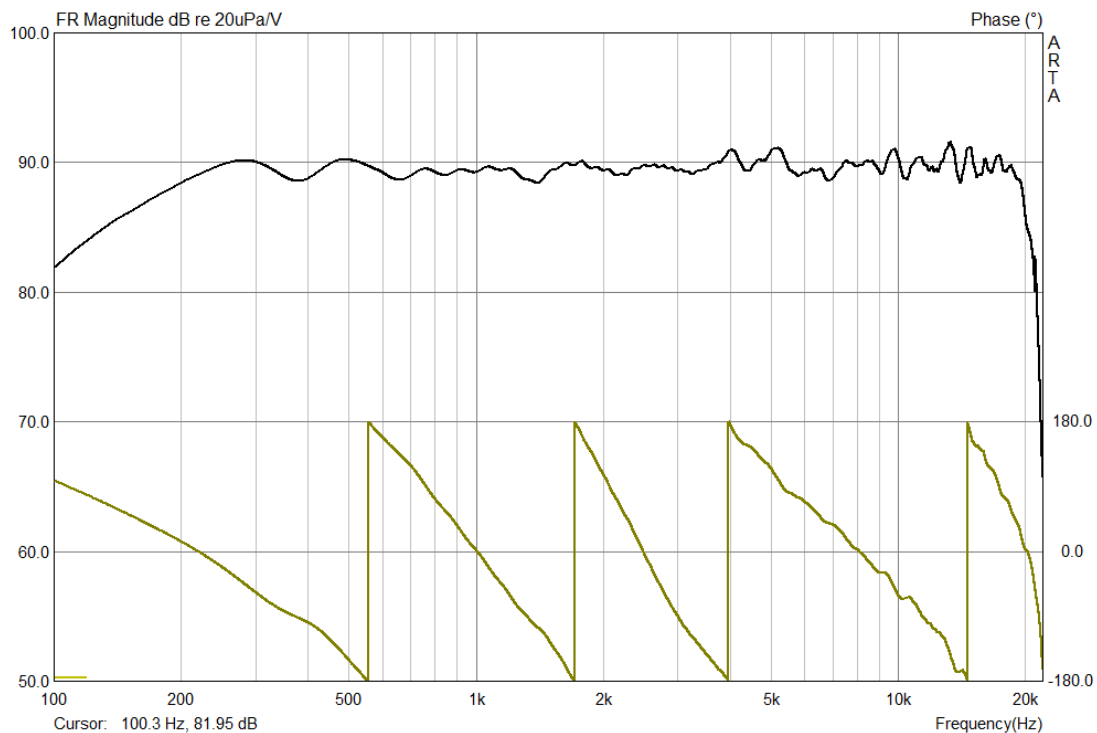


Abbildung 19: Amplituden- und Phasengang (ungeglättet)

Die Gruppenlaufzeit liegt über den gesamten Bereich unterhalb der Hörschwelle.

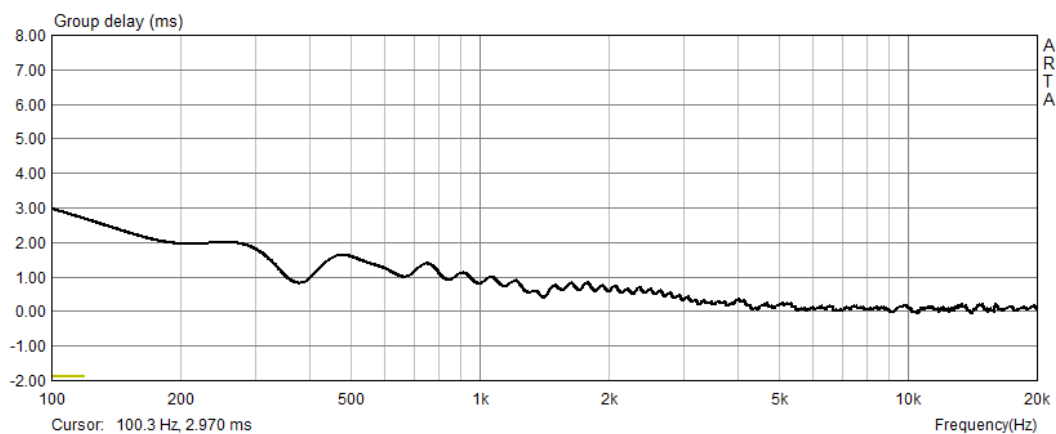


Abbildung 20: Gruppenlaufzeit

### 3.4 Abstrahlverhalten

Das horizontale Abstrahlverhalten zeigt sich wie erwartet im Bereich 700 – 17.000 Hz relativ konstant. Zudem ist es komplett frei von Sprungstellen. Der Abstrahlwinkel beträgt ca. 100°. Der Tiefmitteltöner strahlt erwartungsgemäß breiter ab.

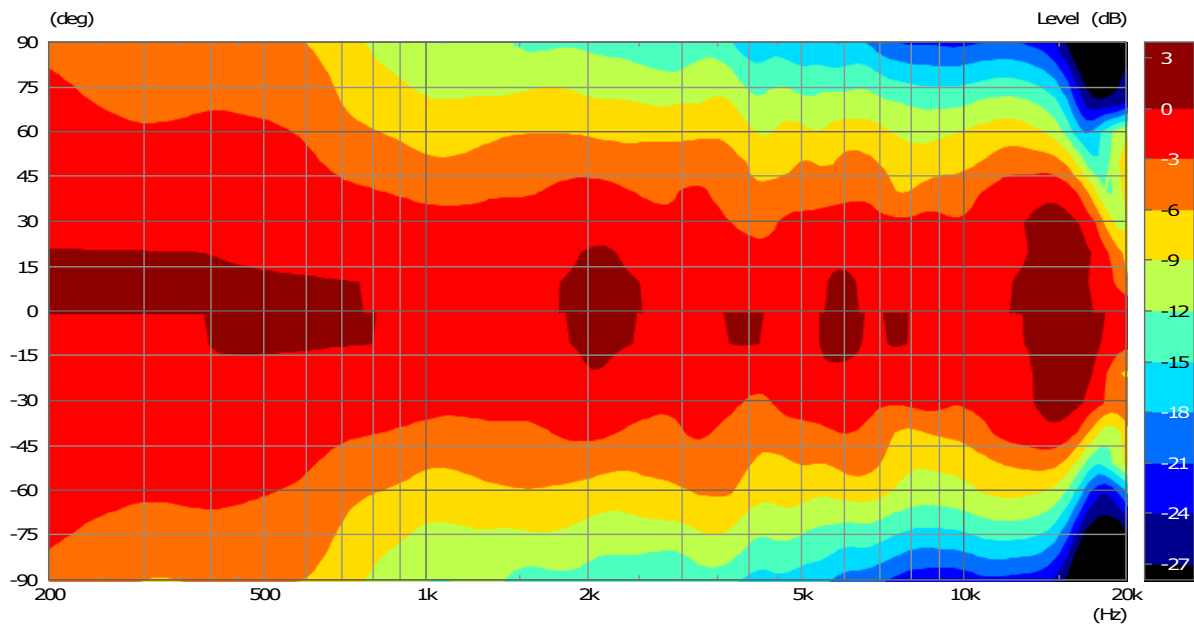


Abbildung 21: Horizontales Abstrahlverhalten

Das Bündelungsmaß zeigt ebenso das sehr stetige Verhalten mit geringen Schwankungen.

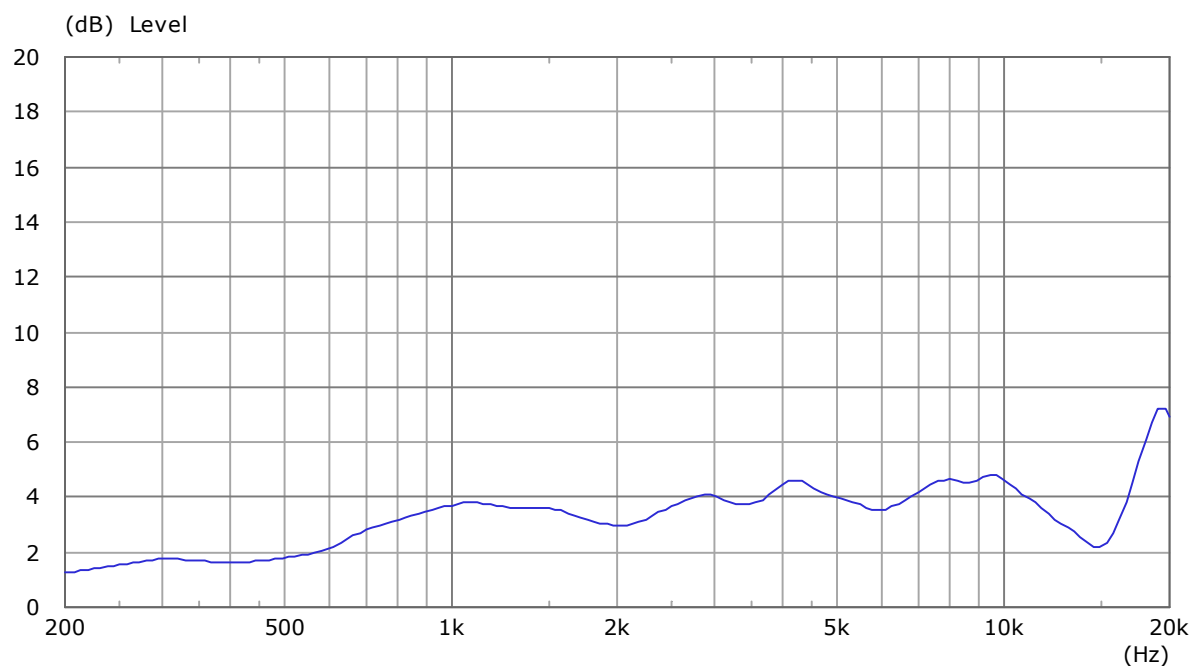


Abbildung 22: Bündelungsmaß (Halbzylinder bezogen)

### 3.5 Nichtlineare Verzerrungen

Die folgenden Messungen wurden nachträglich mit dem Messmikrofon Audix TM-1 in einem kleineren Raum durchgeführt, da dies deutlich geringere Verzerrungen aufweist als das zuvor verwendete ECM-40.

Die nichtlinearen Verzerrungen sind vor allem im wichtigen Mitteltonbereich sehr niedrig. Selbst bei 100 dB bleibt K2 in einem weiten Frequenzbereich unter 0,5%. K3 ist im Mittel- und Hochton kaum existent. Erfreulich ist, dass die geringsten Verzerrungen im empfindlichen Mittelton auftreten.

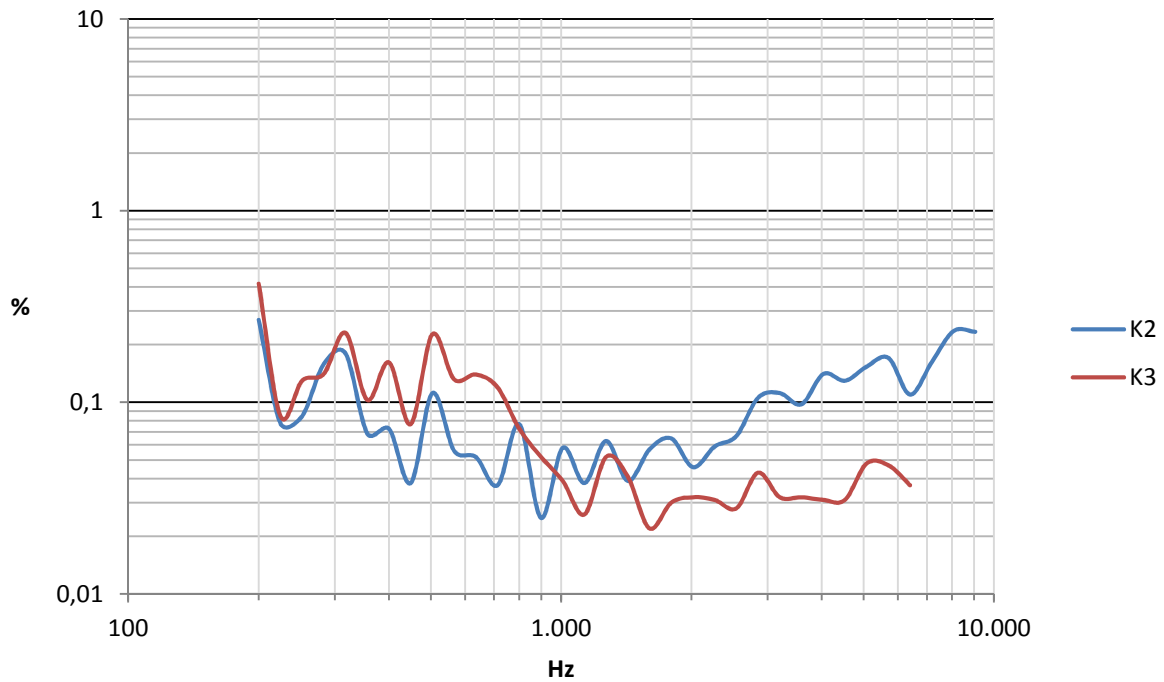


Abbildung 23: Nichtlineare Verzerrungen bei 90 dB

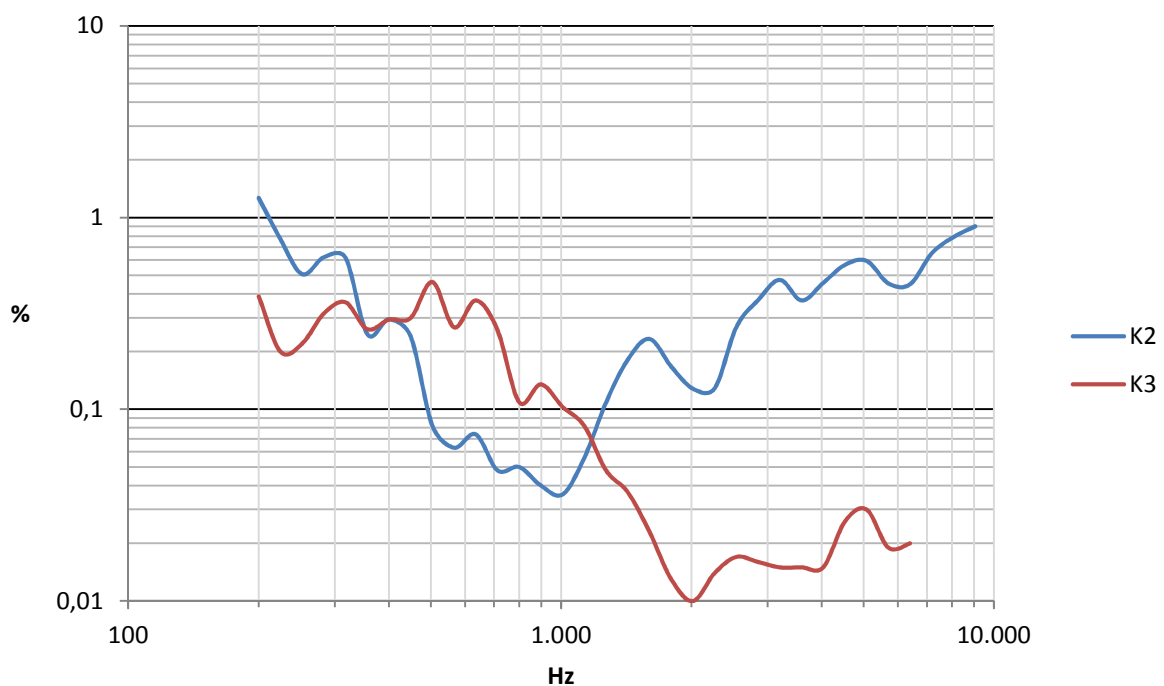


Abbildung 24: Nichtlineare Verzerrungen bei 100 dB



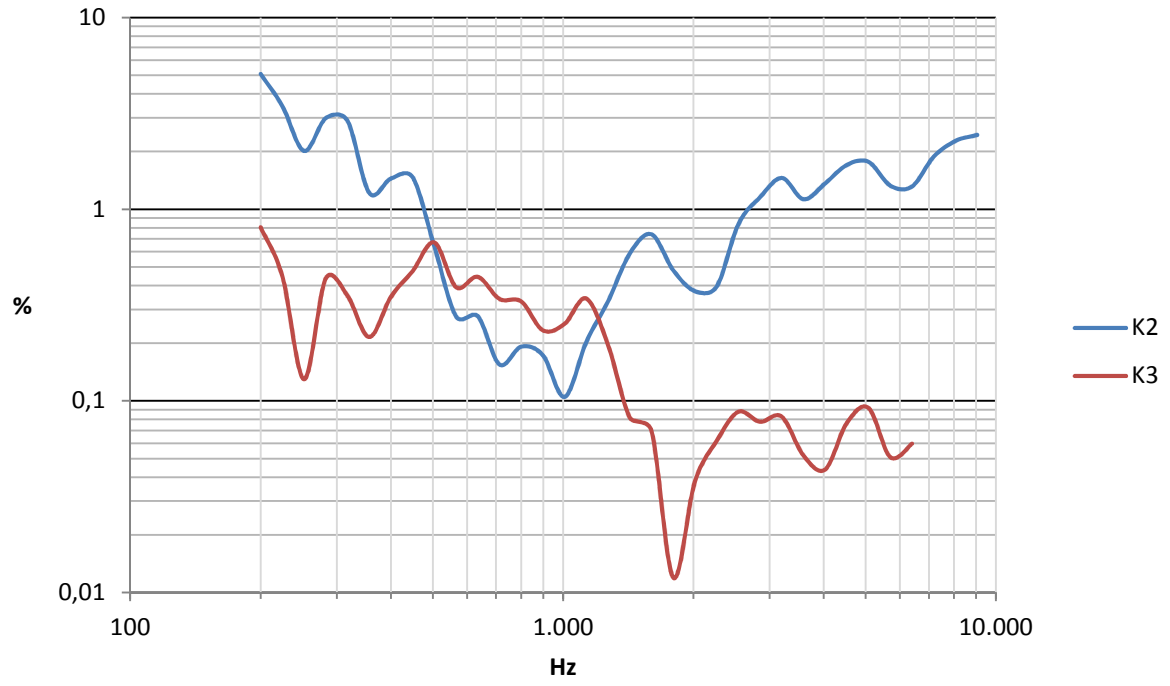


Abbildung 25: Nichtlineare Verzerrungen bei 110 dB

### 3.6 Zerfallsspektrum

Im kumulativen Zerfallsspektrum (CSD) sind keine nennenswerten Resonanzen zu erkennen. Das Gehäuse ist ausreichend bedämpft.

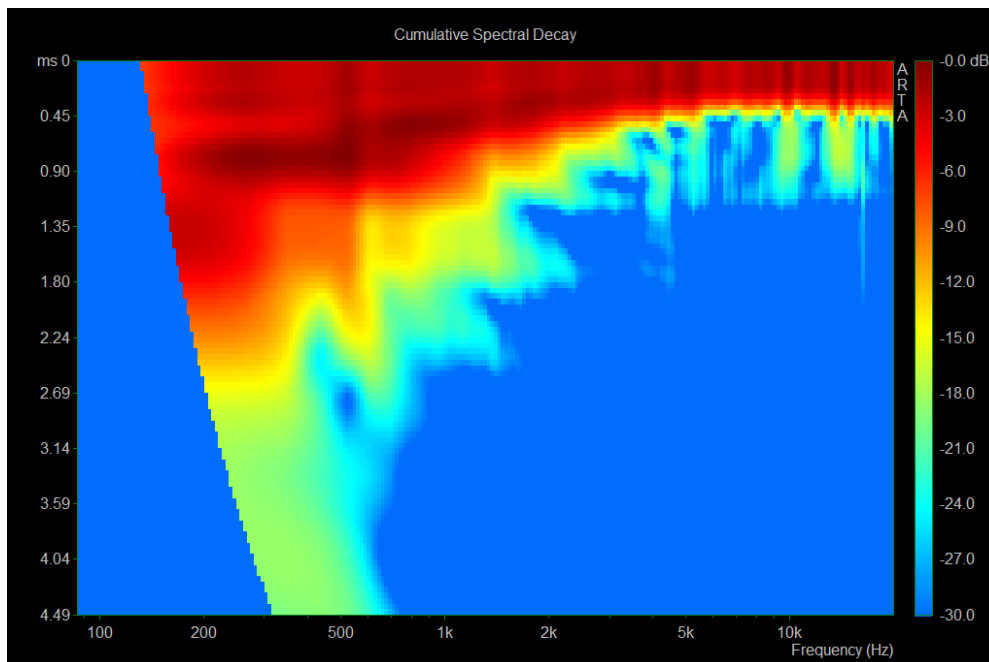


Abbildung 26: Kumulatives Zerfallsspektrum

## 4 Technische Daten

|                                   |                |                                  |
|-----------------------------------|----------------|----------------------------------|
| <b>Freifeldübertragungsmaß:</b>   |                | 200 Hz – 20 kHz, $\pm 1,5$ dB    |
| <b>Abstrahlwinkel horizontal:</b> |                | 100° @ 1 – 15 kHz                |
| <b>Klirrfaktor:</b>               | < 0,3 % in 1 m | 1 kHz @ 100 dB SPL               |
| <b>Eingänge analog:</b>           | Aktivweiche:   | 1 x XLR symmetrisch              |
|                                   | Endstufe:      | 3 x XLR symmetrisch              |
|                                   | Lautsprecher:  | speakON 8-polig                  |
| <b>Tiefmitteltöner:</b>           |                | 300 mm Konuslautsprecher         |
| <b>Mitteltöner:</b>               |                | 75 mm Kalotte                    |
| <b>Hochtöner:</b>                 |                | 26 mm Kalotte                    |
| <b>Trennfrequenzen:</b>           |                | 100 Hz (24 dB/Okt)               |
|                                   |                | 600 Hz (24 dB/Okt)               |
|                                   |                | 2400 Hz (48 dB/Okt)              |
| <b>DAC/ADC:</b>                   |                | 20 Bit, 48 kHz                   |
| <b>Interne Genauigkeit:</b>       |                | 40 Bit                           |
| <b>Equalizer:</b>                 |                | 5 x IIR-Filter zur Raumanpassung |
| <b>Endstufen:</b>                 |                | 3 x 180 W RMS @ 4 $\Omega$       |
| <b>Abmessungen:</b>               |                | 670 x 330 x 170 mm (H x B x T)   |